XXVI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRÍCOS

POTENCIAIS IMPACTOS DA MUDANÇA CLIMÁTICA NOS NIVEIS DE ÁGUA DA LAGOA MIRIM/BR USANDO DADOS AR6 DO MODELO CANESM5

Andrés Mauricio Munar[1] ; Juan Martín Bravo[2]; Matheus Henrique Tavares[3]; J. Rafael Cavalcanti[4] & David Da Motta Marques[5]

Abstract: Global climate models (GCMs) are indispensable for projecting future climate and informing adaptation strategies. The GCMs developed for the IPCC Sixth Assessment Report (AR6) more accurately represent key precipitation characteristics across most of South America. This study evaluates climate-change impacts on water levels in Lake Mirim (Brazil) by coupling large-scale hydrology (MGB-IPH) with hydrodynamics and water-quality modeling (IPH-ECO), forced by CanESM5 model projections. We consider three scenarios: baseline (historical), SSP245 (moderate forcing), and SSP585 (high forcing). Our findings show substantial increases in water-level variability and extremes, with magnitudes varying by scenario: SSP245 yields moderate peak-level rises, whereas SSP585 forecasts dramatic surges. The integrated MGB-IPH / IPH-ECO framework accurately reproduces Lake Mirim's spatiotemporal surface-water dynamics, demonstrating strong predictive performance. Such coupled models offer a powerful tool for assessing climate impacts and guiding sustainable basin management

Resumo: Os modelos climáticos globais GCMs são ferramentas essenciais na previsão de riscos e o desenvolvimento de estratégias de adaptação, pois fornecem cenários detalhados das condições climáticas futuras. A geração desses modelos utilizada no Sexto Relatório de Avaliação de mudança climática (AR6) tem melhorado a representação das principais características da precipitação na maior parte da América do Sul. Este estudo avalia os potenciais impactos da mudança climática nos níveis de água da Lagoa Mirim (Brasil), integrando modelagem hidrológica de grande escala (MGB-IPH) e modelagem hidrodinâmica/qualidade da água (IPH-ECO) junto com projeções climáticas do GCM CanESM5. Foram avaliados três cenários: Histórico (cenário atual), SSP245 (cenário menos pessimista) e SSP585 (cenário mais pessimista). Os resultados mostram aumentos significativos na variabilidade e nos extremos dos níveis de água na lagoa, com diferenças marcantes dependendo do cenário considerado. No SSP245, são projetados aumentos moderados nos níveis máximos da água, enquanto o SSP585 sugere aumentos drásticos. A integração dos modelos MGB-IPH e IPH-ECO melhorou a capacidade de representar a variabilidade espacial e temporal dos níveis da superfície da água na lagoa, mostrando precisão na representação do comportamento hidrodinâmico do sistema, destacando sua capacidade de previsão. Os modelos hidrológicos e hidrodinâmicos acoplados em

1) Affiliation: Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Telefone: +55 51 3308-6686, mauriciomunar4@gmail.com
2) Affiliation: Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Telefone: +55 51 3308-6686, jumarbra@iph.ufrgs.br
3) Affiliation: Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Telefone: +55 51 3308-6686, matheus.tavares@ufrgs.br
4) Affiliation: Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Telefone: +55 51 3308-6686, rafael.cavalcanti@ufrgs.br
5) Affiliation: Instituto de Pesquisas Hidráulicas IPH, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Telefone: +55 51 3308-6686, dmottamarques@gmail.com

grande escala podem beneficiar os futuros esforços de modelagem, fornecendo uma ferramenta de gerenciamento eficaz para estudar os impactos da mudança climática e processos físicos e ecológicos nesses ecossistemas.

Palavras-Chave: Modelo MGB-IPH, Modelo IPH-ECO, Lagoa Mirim, Mudança Climática.

INTRODUÇÃO

A intensificação dos impactos da mudança climática vem impondo desafios significativos para a gestão sustentável dos recursos hídricos, sobretudo em regiões sensíveis como as zonas costeiras e lacustres (IPCC, 2022). Impactos em ecossistemas como lagos e reservatórios causam alterações nos processos hidrológicos nas bacias de contribuição e provocam mudanças significativas nos níveis de água e nos componentes hidrodinâmicos (Woolway *et al.*, 2021; Xue *et al.*, 2022).

Tradicionalmente, avaliações sobre respostas hidrológicas a mudança climática tem sido conduzidas utilizando abordagens fragmentadas, que frequentemente consideram apenas componentes hidrológicos ou hidrodinâmicos isoladamente (Munar *et al.*, 2018). Além, muitos estudos desconsideraram as incertezas intrínsecas associadas às projeções climáticas e a variabilidade espacial dos processos hidrológicos em grandes escalas (Anaraki *et al.*, 2021; Tagliabue *et al.*, 2021; Zhang and Chen, 2021). Abordagens integrando modelos hidrológicos robustos com modelos hidrodinâmicos e projeções climáticas recentes, tornam-se essenciais para reduzir incertezas e fornecer respostas mais confiáveis para a gestão adaptativa (Brêda *et al.*, 2020, 2023; Munar *et al.*, 2023).

Atualmente, a nova geração de GCMs utilizados no Sexto Relatório de Avaliação de mudança climática AR6 (Peters *et al.*, 2023) tem melhorado a representação das principais características da precipitação permitindo uma estimativa mais robusta das mudanças projetadas na precipitação para a maior parte da América do Sul (O'Neill *et al.*, 2016; Dong *et al.*, 2020; Almazroui *et al.*, 2021a; Collazo *et al.*, 2022).

Nesse sentido, este estudo integrou o Modelo Hidrológico de Grandes Bacias (MGB-IPH) e o modelo hidrodinâmico/ qualidade de água IPH-ECO, junto com projeções climáticas do GCM CanESM5 para avaliar os potenciais impactos da mudança climática nos níveis de água da Lagoa Mirim. Esta abordagem integrada possibilitou uma estimativa preliminar dos impactos futuros do clima sobre os níveis da água na lagoa, confirmando a operacionalidade dos procedimentos para que posteriormente possam ser utilizados um conjunto de modelos climáticos com cujos resultados se fornecerá uma base científica sólida para políticas públicas de adaptação à mudança climática.

METODOLOGIA

Área de estudo

A bacia hidrográfica da Lagoa Mirim está localizada entre latitudes de 31°00' e 35°00'S e longitudes 52°15' e 55°15'W (Fig. 1). Apresenta uma área superficial aproximada de 58.400 Km^2, sendo 32.704 Km^2 (56%) em território uruguaio e 25.696 Km^2 (44%) em território brasileiro. O modelo digital de elevação derivado do SRTM (Farr *et al.*, 2007) mostra que a topografia é variável

com áreas montanhosas que atingem elevações de 509 m.s.n.m e áreas planas alagáveis ao redor da Lagoa Mirim com elevações próximas a zero metros.

A bacia hidrográfica da Lagoa Mirim está dividida em seis principais sub-bacias, sendo a sub-bacia do rio Jaguarão a maior do lado brasileiro (13.1% da área total), e a sub-bacia do rio Cebollati (29.8%) a maior do lado uruguaio (Fig. 1). A região apresenta um clima sub-tropical, com precipitações médias anuais variando de 1.200 mm a 1.450 mm e temperatura média anual de 16 °C (Kottek *et al.*, 2006). A lagoa desempenha papel importante na manutenção da biodiversidade regional, produção agropecuária e suprimento hídrico para populações locais (Munar *et al.*, 2018, 2019).

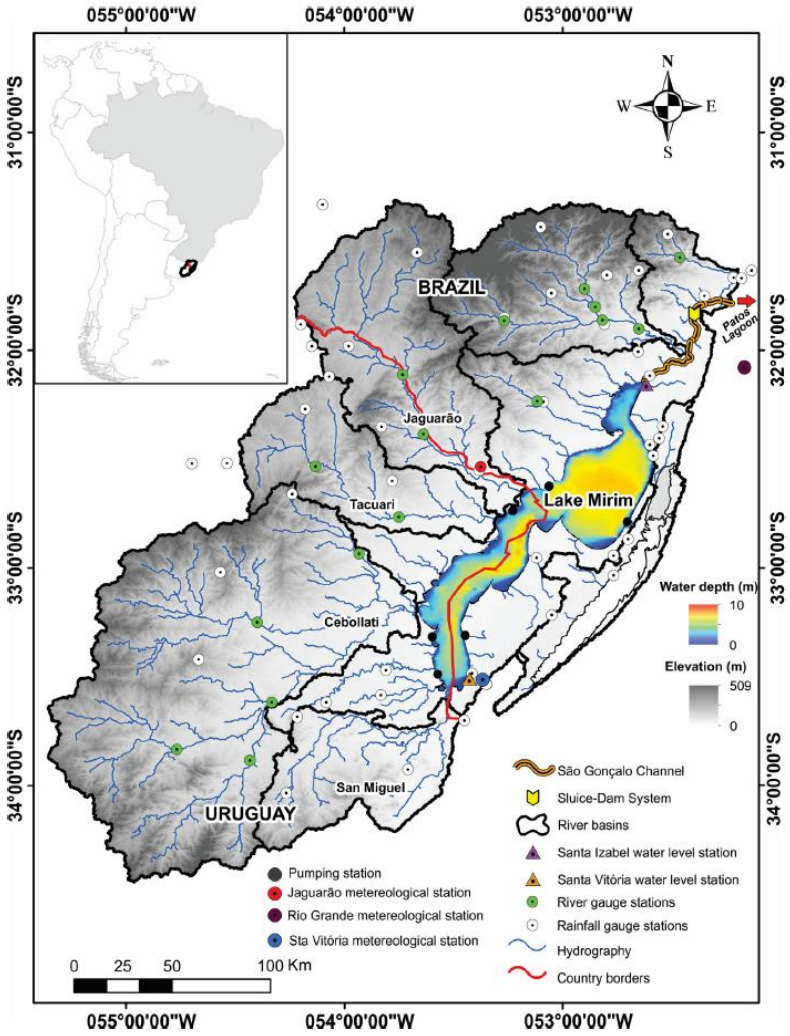


Figura 1. Bacia hidrográfica da Lagoa Mirim mostrando os principais rios, a lagoa, estações hidro/metereológicas e limites internacionais (Munar et al., 2018).

Modelagem hidrológica – hidrodinâmica

A componente hidrológica foi simulada com o Modelo de Grandes Bacias (MGB), o qual é um modelo hidrológico distribuído em grande escala que usa equações físicas e conceituais para prever o processo do ciclo hidrológico terrestre (Collischonn *et al.*, 2007; Pontes *et al.*, 2017). O modelo tem sido amplamente utilizado e validado em diferentes bacias hidrográficas (Siqueira *et al.*, 2018; Fan

et al., 2021; Föeger *et al.*, 2022). Para a simulação detalhada dos níveis de água na Lagoa Mirim, utilizou-se o modelo hidrodinâmico e de qualidade da água IPH-ECO (Fragoso *et al.*, 2008, 2009; Cavalcanti *et al.*, 2016). Esse modelo, descreve os principais componentes hidrodinâmicos, bióticos e abióticos em ambientes aquáticos. Ele pode ser usado para avaliar processos físicos, químicos ou biológicos separadamente, ou para avaliar a interação simultânea desses processos (Fragoso *et al.*, 2011).

A série temporal simulada de descargas fluviais do modelo hidrológico foi usada como entrada para o modelo hidrodinâmico. Os modelos foram executados sequencialmente: primeiro o modelo MGB-IPH para estimar o fluxo de entrada na lagoa e, em seguida, o modelo IPH-ECO para estimar e calibrar os níveis de água, usando os dados observados em duas estações na Lagoa Mirim (Fig. 1). Neste estudo, foi utilizado o modelo hidrodinâmico previamente calibrado e validado usando dados observados nas estações de nível de água de Santa Izabel (extremo norte da lagoa) e Santa Vitória (extremo sul da lagoa). Detalhes sobre o acoplamento dos modelos, parametrização, calibração e validação da abordagem acoplada, dados de entrada e condições de contorno, podem ser encontrados em Munar et al. (2018).

Cenários de mudança climática

Para avaliar os impactos da mudança climática sobre os níveis de água da Lagoa Mirim, o modelo MGB-IPH foi alimentado com projeções climáticas do modelo CanESM5 (*The Canadian Earth System Model version 5*) (IPCC, 2022) e três cenários: Histórico (período atual), SSP245 (cenário menos pessimista) e SSP5-8.5 (cenário mais pessimistas). Tanto o período atual como o período futuro abrangem uma janela de 20 anos de dados diários, sendo o período atual de 01/01/1995 a 31/12/2014, e o período futuro de 01/01/2081 a 31/12/2100. Para mitigar a influência das condições iniciais no modelo, foi usado o primeiro ano como tempo de inicialização.

Além disso, foi feita a remoção de viés dos dados diários de precipitação utilizando o método mapeamento quantil-quantil (Bárdossy and Pegram, 2011), baseado na comparação das curvas cumulativas de probabilidade da variável observada e da variável estimada por um GCM no período histórico e no período futuro. No caso dos dados de temperatura diária, a remoção de viés foi feita utilizado o método *Linear Scaling* (Fang *et al.*, 2015), baseado na comparação das normais climatológicas mensais observadas e estimadas pelo modelo no período histórico e futuro.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A comparação dos potenciais impactos da mudança climática nos níveis da água na Lagoa Mirim nas estacoes Santa Izabel e Santa Vitória para os diferentes cenários avaliados são apresentadas nas Figuras 2, 3, 4 y 5. Em termos gerais, os resultados mostram uma variabilidade significativa associada aos cenários futuros (SSP245 e SSP585) no modelo CanESM5 em comparação com o cenário histórico.

Estação Santa Izabel

Os resultados dos níveis superficiais da água no cenário histórico em comparação com os cenários SSP245 e SSP585 revelam uma tendencia com padrões amplamente semelhantes, mas com

divergências pontuais notáveis (Fig. 2). Como esperado, o cenário SSP585, mostra níveis de água ligeiramente mais altos em períodos específicos, especialmente em torno dos meses do maio, junho e julho, indicando maior variabilidade sazonal em relação ao cenário histórico. O SSP245 reflete uma oscilação intermediária, indicando alguma estabilidade em relação ao SSP585, mas com eventos pontuais. Valores extremos (outliers) são evidentes, principalmente de abril a junho, sugerindo uma possível intensificação de eventos extremos de inundação em cenários climáticos futuros.

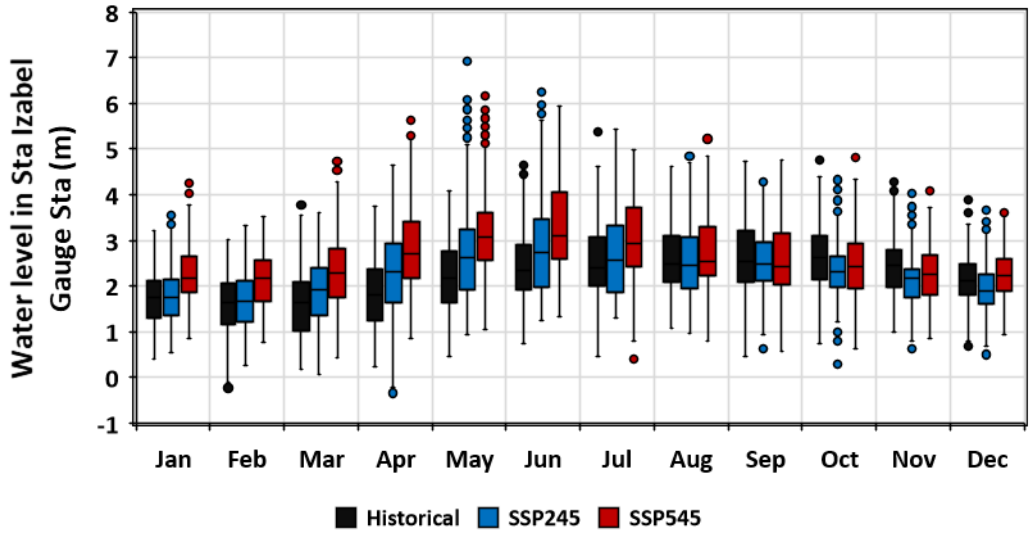


Figura 2. Impactos esperados nos níveis da água da Lagoa Mirim na estação **Santa Izabel** nos cenários histórico e futuros SSP245/SSP585 com base no modelo CanESM5.

Os resultados também mostram que, em longo prazo, existe uma tendência de aumento significativo dos níveis de água futuros na estação de Santa Izabel nos cenários de mudança climática projetados, especialmente o SSP585 (Fig. 3a e 3b). Essa condição reflete uma maior frequência e intensidade de eventos hidrológicos extremos em comparação com o cenário histórico e o SSP245.

a) **b)**

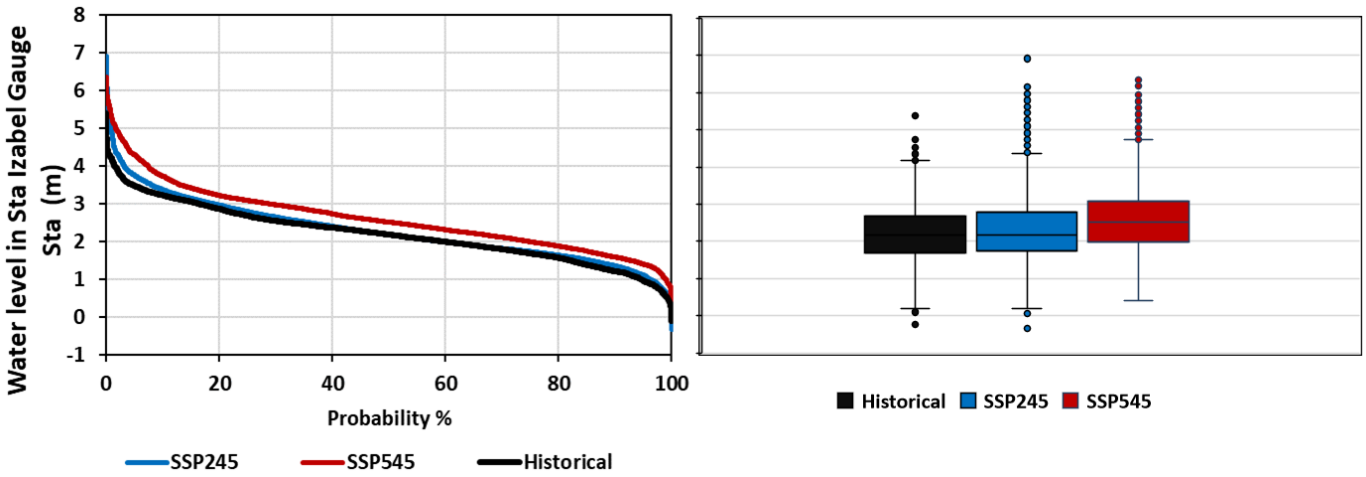


Figura 3. Curva de permanência (**a**) e analise box-plot (**b**) dos níveis de água em longo prazo na Lagoa Mirim na estação de **Santa Izabel** nos cenários histórico e futuros SSP245/SSP585 com base no modelo CanESM5.

A curva de permanência para os níveis de água mostra claramente que os níveis associados ao cenário SSP585 (vermelho) são mais altos em quase todo o espectro de probabilidade (Fig. 3a), especialmente em eventos extremos (probabilidade <20%), indicando aumentos significativos na frequência e na magnitude de futuras inundações extremas em comparação com o período histórico e com o cenário SSP245. O cenário SSP245 mostra um comportamento intermediário, indicando aumentos moderados em comparação com o histórico. Esse padrão pode implicar possíveis aumentos nos riscos de inundação em cenários climáticos com uso intensivo de emissões (SSP585).

O analise box-plot confirma a tendência mostrada na curva de permanência, onde os níveis medianos de SSP585 são significativamente mais altos do que os níveis históricos e moderadamente mais altos do que SSP245, revelando aumentos notáveis no nível médio e na dispersão dos dados. Além disso, a quantidade considerável de outliers mais altos observados para SSP585 destaca uma frequência crescente de eventos extremos, indicando maior variabilidade e risco hídrico em cenários futuros.

Estação Santa Vitória

A comparação mensal entre os níveis de água no cenário histórico e futuros SSP245 e SSP585 na estação de Santa Vitória revelam também uma tendência clara no aumento progressivo dos níveis de água de janeiro a junho, atingindo picos notáveis em maio e junho (Fig. 4). Os cenários futuros mostram níveis sistematicamente mais altos do que cenário histórico, com o SSP585 sendo geralmente o mais alto, indicando que as condições futuras podem exacerbar eventos extremos, especialmente em períodos críticos. Entre janeiro e março, os cenários climáticos projetam aumentos moderados, especialmente em SSP585, em comparação com o cenário histórico. De abril a junho, essas diferenças se tornam mais acentuadas, evidenciadas por níveis médios mais altos e numerosos valores extremos que podem estar associados a eventos de inundação mais frequentes em condições climáticas futuras. De julho em diante, os níveis começam a diminuir, embora mantendo a tendência do SSP585 acima dos outros cenários.

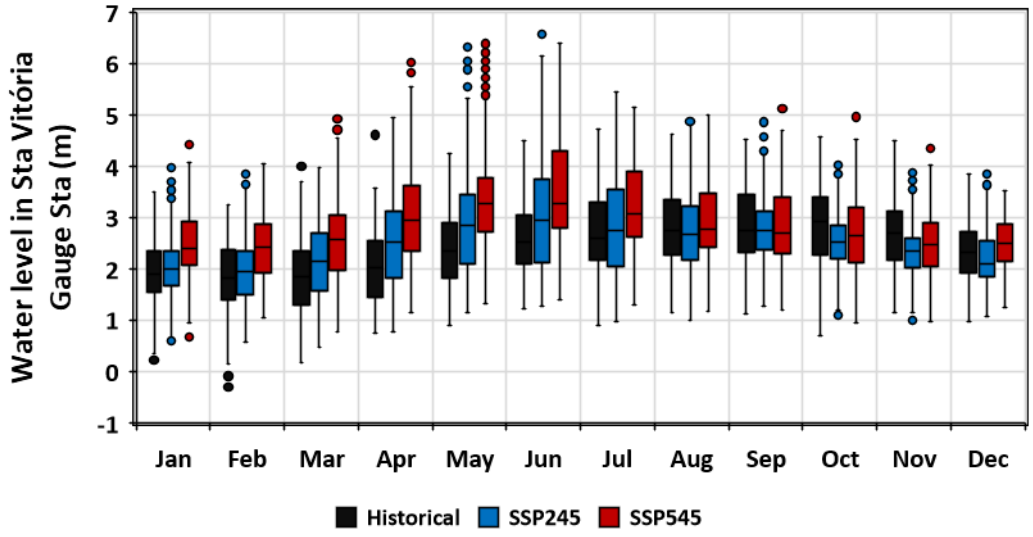


Figura 4. Impactos esperados nos níveis da água da Lagoa Mirim na estação **Santa Vitória** nos cenários histórico e futuros SSP245/SSP585 com base no modelo CanESM5.

A curva de permanência para os níveis de água na estação Santa Vitória evidencia que tanto o SSP245 quanto o SSP585 mostram níveis de água sistematicamente acima dos níveis históricos em praticamente toda a faixa de probabilidades, com diferenças particularmente marcantes em eventos de baixa probabilidade (níveis altos), sugerindo uma intensificação de eventos extremos (Fig. 5a). Como esperado, o cenário SP585 é o mais crítico, com níveis máximos mais altos, representando um risco significativo para áreas vulneráveis a inundações.

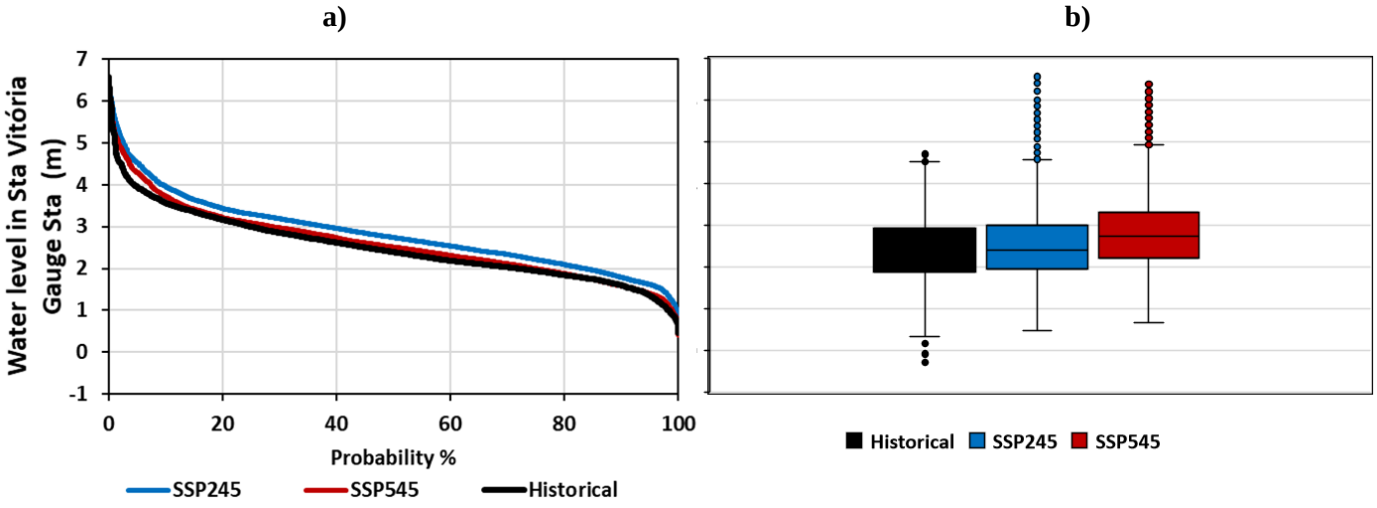


Figura 5. Curva de permanência (**a**) e analise box-plot (**b**) dos níveis de água em longo prazo na Lagoa Mirim na estação de **Santa Vitória** nos cenários histórico e futuros SSP245/SSP585 com base no modelo CanESM5.

O analise box-plot também confirma as diferenças entre os cenários analisados (Fig. 5b). O nível médio e a faixa interquartil são mais altos no SSP585, seguidos pelo SSP245 e depois pelo cenário histórico. A abundância de outliers nos cenários projetados se destaca, indicando uma frequência

maior de eventos hidrológicos extremos no futuro. A dispersão vertical e o aumento da mediana no SSP585 refletem uma intensificação do regime hidrológico.

Os resultados apresentados neste trabalho estão de acordo com os resultados apresentados em outros estudos (Brêda *et al.*, 2023; Wang and Gao, 2025; Wang *et al.*, 2025). Almazroui et al. (2021b) e IPCC (2022) mostraram que a região onde a bacia hidrográfica da Lagoa Mirim está inserida manteve alto grau de concordância quanto ao aumento da precipitação projetado pelos Modelos Climáticos Globais (> 66% dos modelos concordando) no AR6 (Bravo et al., 2024). Além disso, como observado nos resultados do AR5 na região, no AR6 períodos futuros mais distantes e cenários mais pessimistas apresentaram projeções de aumento de precipitação com maiores magnitudes.

CONCLUSÕES

Este estudo apresentou uma abordagem preliminar para avaliar os potencias impactos da mudança climática nos níveis de água da Lagoa Mirim, acoplando modelagem hidrológica de grande escala (MGB-IPH), modelagem hidrodinâmica/qualidade da água (IPH-ECO) e projeções climáticas do modelo CanESM5. Os resultados revelam que os níveis de água nas estações de Santa Izabel e Santa Vitória apresentarão aumentos significativos nos cenários climáticos futuros SSP245 e, principalmente, SSP585, em comparação com o cenário histórico analisado. As curvas de permanência mostram que, os percentis mais altos (eventos de baixa probabilidade) são deslocados para valores mais altos, particularmente no cenário de altas emissões (SSP585), indicando uma intensificação das inundações extremas.

A análise de box-plot mensal revela que o aumento mais acentuado ocorre entre abril e junho, com medianas mais altas e maior dispersão de valores no cenário SSP585. Esse deslocamento sazonal do pico nos níveis da água pode potenciar os riscos associados às inundações nos meses mais chuvosos.

O comportamento intermediário do cenário SSP245 destaca a eficácia das políticas de mitigação moderadas: embora também projete aumentos de nível em comparação com os níveis do cenário histórico, sua magnitude e frequência de extremos são menos graves do que no cenário SSP585. Isso indica que medidas abrangentes para limitar as emissões podem reduzir substancialmente os impactos hidrológicos negativos. Além disso, a grande dispersão dos dados e a presença de inúmeros valores discrepantes nos cenários futuros destacam a importância de incorporar as incertezas climáticas e hidrológicas ao planejamento.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o financiamento desta pesquisa ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à CAPES, FAPERGS e FINEP do Brasil.

REFERÊNCIAS

ALMAZROUI, M.; ASHFAQ, M.; ISLAM, M. N. (2021). *"Assessment of CMIP6 Performance and Projected Temperature and Precipitation Changes Over South America"*. Earth Systems and Environment 5(2), pp. 155–183.

ALMAZROUI, M.; SAEED, F.; SAEED, S. (2021). *"Projected Changes in Climate Extremes Using CMIP6 Simulations Over SREX Regions"*. Earth Systems and Environment 5(3), pp. 481–497.

ANARAKI, M. V.; FARZIN, S.; MOUSAVI, S.-F.; KARAMI, H. (2021). *"Uncertainty Analysis of Climate Change Impacts on Flood Frequency by Using Hybrid Machine Learning Methods"*. Water Resources Management 35(1), pp. 199–223.

BÁRDOSSY, A.; PEGRAM, G. (2011). *"Downscaling precipitation using regional climate models and circulation patterns toward hydrology"*. Water Resources Research 47(4).

BRAVO, J. M.; MUNAR, A. M.; MOTTA MARQUES, D. DA; SALDANHA FERRARI, C. H.; RIBEIRO RODRIGUES, L. H. (2024). *"Anomalias de chuva total anual em cenários de mudança climática do AR6 na bacia da Lagoa Mirim/BR"*. In Proceedings of the 31st IAHR LAD Congress, Medellin, 2024.

BRÊDA, J. P. L. F.; CAUDURO DIAS DE PAIVA, R.; SIQUEIRA, V. A.; COLLISCHONN, W. (2023). *"Assessing climate change impact on flood discharge in South America and the influence of its main drivers"*. Journal of Hydrology 619 (129284)

BRÊDA, J. P. L. F.; DE PAIVA, R. C. D.; COLLISCHON, W. (2020). "*Climate change impacts on South American water balance from a continental-scale hydrological model driven by CMIP5 projections".* Climatic Change, pp. 503–522.

CAVALCANTI, J. R.; DA MOTTA-MARQUES, D.; FRAGOSO, C. R. (2016). *"Process-based modeling of shallow lake metabolism: Spatio-temporal variability and relative importance of individual processes"*. Ecological Modelling 323, pp. 28–40.

COLLAZO, S.; BARRUCAND, M.; RUSTICUCCI, M. (2022). *"Evaluation of CMIP6 models in the representation of observed extreme temperature indices trends in South America".* Climatic Change 172(1–2), pp. 21.

COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; DA SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. (2007). *"The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling"*. Hydrological Sciences Journal 52(5), pp. 878–895.

DONG, Y.; ARMOUR, K. C.; ZELINKA, M. D. (2020). *"Intermodel Spread in the Pattern Effect and Its Contribution to Climate Sensitivity in CMIP5 and CMIP6 Models*". Journal of Climate, v. 33, n. 18, p. 7755–7775, 2020.

FAN, F. M.; SIQUEIRA, V. A.; FLEISCHMANN, A. S. (2021). *"On the discretization of river networks for large scale hydrologic-hydrodynamic models"*. RBRH 26.

FANG, G. H.; YANG, J.; CHEN, Y. N.; ZAMMIT, C. (2015). *"Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China*". Hydrology and Earth System Sciences 19 (6), pp. 2547–2559.

FARR, T. G.; ROSEN, P. A.; CARO, E, … (2007). *"The Shuttle Radar Topography Mission"*. Reviews of Geophysics, pp. 1–33.

FÖEGER, L.; BUARQUE, D. C.; PONTES, P. R. M.; FAGUNDES, H. DE O.; FAN, F. M. (2022). *"Large-scale sediment modeling with inertial flow routing: Assessment of Madeira river basin"*. Environmental Modelling & Software 149 (105332).

FRAGOSO, C. R.; MARQUES, D. M. L. M.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; VAN NES, E. H. (2008). *"Modelling spatial heterogeneity of phytoplankton in Lake Mangueira, a large shallow subtropical lake in South Brazil".* Ecological Modelling 219 (1–2), pp. 125–137.

FRAGOSO, C. R.; MOTTA MARQUES, D. M. L.; FERREIRA, T. F.; JANSE, J. H.; VAN NES, E. H. (2011). *"Potential effects of climate change and eutrophication on a large subtropical shallow lake*". Environmental Modelling & Software 26 (11), pp. 1337–1348.

FRAGOSO, C. R.; VAN NES, E. H.; JANSE, J. H.; DA MOTTA MARQUES, D. (2009). *"IPH-TRIM3D-PCLake: A three-dimensional complex dynamic model for subtropical aquatic ecosystems".* Environmental Modelling & Software 24 (11), pp. 1347–1348.

IPCC. Climate Change (2022): *"Impacts, Adaptation and Vulnerability".* Intergovernmental Panel on Climate Change.

KOTTEK, M.; GRIESER, J.; BECK, C.; RUDOLF, B.; RUBEL, F. (2006). *"World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated"*. Meteorologische Zeitschrift 15(3), pp. 259–263.

MUNAR, A. M.; CAVALCANTI, J. R.; BRAVO, J. M. (2018). *"Coupling large-scale hydrological and hydrodynamic modeling: Toward a better comprehension of watershed-shallow lake processes*". Journal of Hydrology 564, pp. 424–441.

MUNAR, A. M.; CAVALCANTI, J. R.; BRAVO, J. M.; DA MOTTA-MARQUES, D.; FRAGOSO, C. R. (2019). *"Assessing the large-scale variation of heat budget in poorly gauged watershed-shallow lake system using a novel integrated modeling approach".* Journal of Hydrology 575, pp. 244–256.

MUNAR, A. M.; MENDEZ, N.; NARVAEZ, G. (2023). *"Modelling the climate change impacts on river discharge and inundation extent in the Magdalena River basin – Colombia".* Hydrological Sciences Journal 1(1), pp. 1–15.

O'NEILL, B. C.; TEBALDI, C.; VAN VUUREN, D. P. (2016). *"The Scenario Model Intercomparison Project (ScenarioMIP) for CMIP6"*. Geoscientific Model Development 9(9), pp. 3461–3482.

PETERS, G. P.; AL KHOURDAJIE, A.; SOGNNAES, I.; SANDERSON, B. M. (2023). *"AR6 scenarios database: an assessment of current practices and future recommendations".* Climate Action 2(1), pp. 31.

PONTES, P.; MAINARDI, F.; SANTOS, A. (2017). *"Environmental Modelling & Software MGB-IPH model for hydrological and hydraulic simulation of large floodplain river systems coupled with open source GIS"*. Environmental Modelling & Software 94, pp. 1-20.

SIQUEIRA, V. A.; PAIVA, R. C. D.; FLEISCHMANN, A. S. (2018). *"Toward continental hydrologic–hydrodynamic modeling in South America".* Hydrology and Earth System Sciences 22 (9), pp. 4815–4842.

TAGLIABUE, A.; KWIATKOWSKI, L.; BOPP, L. (2021). *"Persistent Uncertainties in Ocean Net Primary Production Climate Change Projections at Regional Scales Raise Challenges for Assessing Impacts on Ecosystem Services*". Frontiers in Climate 3.

WANG, H.; LIU, J.; LUO, Z.; NAZLI, S.; SHI, L. (2025). *"Hydrologic response and prediction of future water level changes in Qinghai Lake of Tibet Plateau, China*". Journal of Hydrology: Regional Studies 57, pp. 102168.

WANG, X.; GAO, B. (2025). *"Future hydrological changes of the upstream basin and their effects on the water level of the Qinghai Lake".* Journal of Hydrology: Regional Studies 59, pp. 102425.

WOOLWAY, R. I.; JENNINGS, E.; SHATWELL, T. (2021). *"Lake heatwaves under climate change*". Nature 589 (7842), pp. 402–407.

XUE, P.; YE, X.; PAL, J. S. (2022). *"Climate projections over the Great Lakes Region: using two-way coupling of a regional climate model with a 3-D lake model"*. Geoscientific Model Development 15 (11), pp. 4425–4446.

ZHANG, S.; CHEN, J. (2021). *"Uncertainty in Projection of Climate Extremes: A Comparison of CMIP5 and CMIP6".* Journal of Meteorological Research 35(4), pp. 646–662.